

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2003年9月4日 (04.09.2003)

PCT

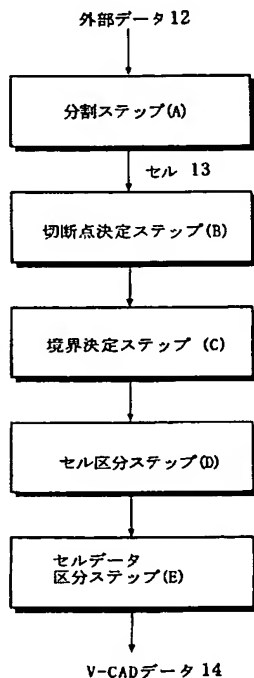
(10) 国際公開番号
WO 03/073335 A1

- (51) 国際特許分類: G06F 17/50 (72) 発明者: および
(21) 国際出願番号: PCT/JP03/02197 (75) 発明者/出願人 (米国についてののみ): 手嶋 吉法
(22) 国際出願日: 2003年2月27日 (27.02.2003) (TESHIMA, Yoshinori) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2番1号 理化学研究所内 Saitama (JP). 加瀬 究 (KASE, Kiwamu) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2番1号 理化学研究所内 Saitama (JP). 宇佐見 修吾 (USAMI, Shugo) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2番1号 理化学研究所内 Saitama (JP). 牧野内 昭武 (MAKINOUCHI, Akitake) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2番1号 理化学研究所内 Saitama (JP).
(25) 国際出願の言語: 日本語
(26) 国際公開の言語: 日本語
(30) 優先権データ: 特願2002-53575 2002年2月28日 (28.02.2002) JP
(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 理化学研究所 (RIKEN) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2番1号 Saitama (JP). (74) 代理人: 堀田 実 (HOTTA, Minoru); 〒108-0014 東京都港区芝 5丁目2番20号 建築会館4階 Tokyo (JP).

[続葉有]

(54) Title: METHOD AND PROGRAM FOR CONVERTING BOUNDARY DATA INTO IN-CELL SHAPE

(54) 発明の名称: 境界データのセル内形状への変換方法及び変換プログラム



(57) Abstract: A method for converting boundary data into in-cell shape includes a division step (A) of dividing external data (12) consisting of boundary data of an object into cells (13) of orthogonal lattice, a cutting point decision step (B) of deciding the intersection point of the boundary data and the cell edge to be a cell edge cutting point, a boundary decision step (C) of deciding the boundary connecting the obtained cell edge cutting points to be in-cell shape data, a cell division step (D) of dividing the divided cells into non-boundary cells (13a) not containing a boundary plane and boundary cells (13b) containing a boundary plane, and a boundary cell data division step (E) of dividing the cell data constituting the boundary cells into inner cell data located inside the in-cell shape data and outer cell data located outside the in-cell shape data.

(57) 要約: 対象物の境界データからなる外部データ12を直交格子のセル13に分割する分割ステップ(A)と、境界データとセルの稜との交点をセル稜切断点とする切断点決定ステップ(B)と、求めたセル稜切断点を結ぶ境界をセル内形状データとする境界決定ステップ(C)と分割された各セルを境界面を含まない非境界セル13aと境界面を含む境界セル13bとに区分するセル区分ステップ(D)と、境界セルを構成するセルデータをセル内形状データより内側の内部セルデータと外側の外部セルデータに区分する境界セルデータ区分ステップ(E)とを有する。

12...EXTERNAL DATA
(A)...DIVISION STEP
13...CELL
(B)...CUTTING POINT DECISION STEP
(C)...BOUNDARY DECISION STEP
(D)...CELL DIVISION STEP
(E)...CELL DATA DIVISION STEP
14...V-CAD DATA

BEST AVAILABLE COPY

WO 03/073335 A1



(81) 指定国 (国内): CN, JP, US.

(84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (DE, FR, GB).

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

添付公開書類:

— 国際調査報告書

明細書

境界データのセル内形状への変換方法及び変換プログラム

5 発明の背景

発明の技術分野

本発明は、形状と物性を統合した実体データを小さい記憶容量で記憶し、C A Dとシミュレーションを一元化できる実体データの記憶方法に係り、更に詳しく
10 は、境界データのセル内形状データへの変換方法及び変換プログラムに関する。

関連技術の説明

先端的な研究開発・技術開発の現場では、その高度化・複雑化に伴い、膨大な
試行錯誤が不可欠となっており、開発途中でのリスクが高まっている。科学技術
立国を目指す我が国として、これらのリスクを極力排し、開発過程の革新的な高
15 度化・効率化を図ることが極めて重要である。

現在、研究開発・技術開発の現場において、C A D (C o m p u t e r A i
d e d D e s i g n)、C A M (C o m p u t e r A i d e d M a n u f
a c t u r i n g)、C A E (C o m p u t e r A i d e d E n g i n e e
r i n g)、C A T (C o m p u t e r A i d e d T e s t i n g)などが、
20 それぞれ設計、加工、解析、試験のシミュレーション手段として用いられてい
る。

また、本発明によって、連続的なシミュレーションであるC- S i m u l a t
i o n (C o o r p o r a t i v e S i m u l a t i o n)、加工プロセスも
考慮したA- C A M (A d v a n c e d C A M)、究極の精度が出せるD- f
25 a b r i c a t i o n (D e t e r m i n i s t i c f a b r i c a t i o n)
なども、これから広く普及する見通しである。

上述した従来のシミュレーション手段では、対象物を、C S G (C o n s t r
u c t i v e S o l i d G e o m e t r y)やB- r e p (B o u n d a r
y R e p r e s e n t a t i o n)でデータを記憶している。

しかし、CSGでは、対象物全体を微細なソリッドモデルの集合体として記憶するため、データが重くシミュレーション手段（ソフトウェア等）を実装する場合、膨大なデータを扱うこととなり、大型コンピュータを用いた場合でも解析に時間がかかる問題点があった。

- 5 また、B-repでは、対象物を境界で表現するため、データは軽く、データ量は小さくなるが、境界面の内部に関する情報が直接的にはないため、そのままでは変形解析等には適さない問題点があった。

- 更に、これらの従来のデータ記憶手段では、熱・流体解析、固体の大変形解析、これらの連成解析等でその都度、解析に適したメッシュ等に分割して、有限要素
10 法等を適用するため、その解析結果を表示等はできるが、CADとシミュレーションを一元化することが困難であり、設計・解析・加工・組立・試験等の各工程を同じデータで管理することができない問題点があった。

言い換えれば、現状のSolid/Surface-CAD（以下S-CADと呼ぶ）には、以下の問題点があった。

- 15 (1) データが渡らない、内部での変換操作に弱い(数値誤差と処理方法の問題)。
 (2) シミュレーションに直接使えない(メッシュを生成しなくてはいけない)。
 (3) CAMによる加工の検討ができない(最終形状しかもっていない)。

また加工においても以下の問題点があった。

- (1) 加工プロセスの表現ができない(荒加工や工程設計の支援が不十分)。
20 (2) レーザー加工や超先端加工など新しい加工法に対応できていない(切削し
 かない、数値精度が足りない)。
 (3) 加工法自体の選択ができない(複合体で内部に異なる材料特性を有する)。

- 上述した問題点を解決するために、本発明の発明者等は、「形状と物性を統合
した実体データの記憶方法」を創案し、出願した(特願2001-25023、
25 未公開)。

この発明は、図1に模式的に示すように、対象物の境界データからなる外部データを八分木分割により境界平面が直交する立方体のセルに分割し、分割された各セルを境界面を含まない非境界セル13aと境界面を含む境界セル13bとに区分するものである。なおこの図で15は切断点である。

この発明により、各セル毎に種々の物性値を記憶し、形状と物性を統合した実
体データを小さい記憶容量で記憶することができ、これにより、物体の形状・構
造・物性情報・履歴を一元的に管理し、設計から加工、組立、試験、評価など一
連の工程に関わるデータを同じデータで管理することができ、CADとシミュレ
ーションを一元化することができる。

上述した実体データの記憶方法を以下「ボリュームCAD」又は「V-CAD」と呼ぶ。
なお本出願では、V-CADを次のように定義する：「V-CADとは、
v o x e l d a t a s e tのセル内に境界面が張られたものである」。

従来のCADはソリッドと言えども事実上はB-r e p等のように中身の無い
張りぼてであった。これに対してV-CADは、内部まで詰まっており、物理量
も保持できる。内部情報を持つ事により、これまでのB-r e p等の形状処理で
は破綻しやすかった幾何演算が頑健に処理できると期待されている。さらに、V
-CADは単なる形状表現の道具としての枠を超え、シミュレーションや加工に
も直接活かせるデータ基盤となることを目指している。このような「ものづくり」
の体系が真に実現される為には、V-CADを効果的に活かす様なシミュレーシ
ョン技術や加工技術の開発も併行してなされなければならない。特に加工に関し
てはこれまで表面形状のデータだけがもっぱら使われていたもので、ボリュームデ
ータを真に活かしうる加工技術は光造形法やラピッドプロトタイピング（3Dイ
ンクジェット）を除いて殆ど存在してないとも言える。

ものづくりの世界の現状を踏まえたとき、従来型のCADが表す形状を読み込
んでV-CAD内にボリュームデータを生成することは非常に重要なことである。
このため、V-CADでは、境界セルに形状データ（外部データ）の境界を再構成
できる境界データを保有させる必要がある。

従来、ボリュームデータからポリゴンを生成する際に一般に用いられているの
が、M a r c h i n g C u b e s（以下、MCと略す）である。MCは、例え
ば、次の文献1に紹介されている。

（文献1）" MARCHING CUBES: A HIGH RESOLUTION 3D SURFACE CONSTRUCTION ALGORITHM", Computer Graphics, Volume 21, Number

4, J u l y 1 9 8 7.

参考として、図 2 a 乃至図 2 d に 2 次元 MC のすべての切断点パターンおよび境界線分、図 3 a 乃至図 3 n に 3 次元 MC のすべての切断点パターン（境界面は省略）を示す。

- 5 3 次元 MC では、3 次元セル（立方体）の 8 頂点に正負の数値が書き込まれていて、それをもとに等値面を生成する（以下では値がゼロの面を考える）。立方体の稜の両端の数値の符合が異なるならばその稜上に一つの切断点を設け、符合が同じならば切断点は設けない。それを立方体の 1 2 稜について行なったあと、その切断点をもとに面を張るものである。なお 2 次元 MC の場合も同様である。
- 10 図 4 a 乃至図 4 c は、MC と K i t t a C u b e s (K T C) の矩形セルにおける切断点の相違を示す図の一例である。この例において、MC では、図 4 a の様な状況では正方形セルの 4 頂点（白丸）は、いずれも形状（閉じた曲線）の外部に位置するので同じ符合をもち、それゆえセルの 4 稜（4 辺）には切断点が発生することは無く、結果としてこの場合セル内面は全く張られない。これは、
- 15 MC の立場に立てば、この形状を表すには現在の解像度では粗すぎたということの意味する。従って、この例で MC では、セルの 4 稜の切断点を図 4 b 又は図 4 c のように表現できない問題点があった。図 4 a は極端な例であるが、本質的に同じ不具合は頻繁に発生しうるものであり、図 4 d がその一例である。曲がった境界面とセル稜の交差において、頻繁に発生する。K T C ではこれを図 4 f のよ
- 20 うに近似する。MC では図 4 g の様に近似される。図 4 c および図 4 f は二次元における一例である。三次元においては、さらに多くの場合が K T C のみで表現可能である。同じ解像度での K T C は MC より格段に表現力が豊かであることがわかる。

- これに対して、後述する本発明（K T C）では、図 4 b のように 4 稜には切断
- 25 点が 2 つずつ発生し、切断点個数を 1 稜上で 0 個または 1 個に制限すると、図 4 c のように表現できる。

図 5 a と図 5 b は、従来の MC と本発明の K T C の稜の切断点の相違を示す図である。MC 構築の際にも、切断点個数は 1 稜上で 0 個または 1 個に制限されている。図 5 a に例示するように、MC ではセルの各稜の両端の符合が正負逆の場

合に対してのみその稜上に切断点を1つ発生させる。そのため、図5bに示すように、1つの稜上に切断点が与えられたとき、その両端の符合は正負逆の場合のみならず、符合が同じ場合のこともあり、MCではその一部の場合しか、切断点を表現できないことになる。

- 5 図4a乃至図4cにおいて、閉じた実線で示す形状を表現するためには、MCではセルを更に細分する必要が生じる。その結果、MCを用いたV-CADでは、境界データを保有するためにセルを更に細分する必要が生じ、その分、形状と物性を統合した実体データを記憶する記憶容量が指数関数的に増大してしまふ。また、記憶容量が増大を避けると、境界部分の形状を精密に表現することが困難となる。
- 10

発明の要約

- 本発明は、上述した問題点を解決するために創案されたものである。すなわち、
- 15 本発明の目的は、Marching Cubes (MC) によるすべてのセル稜切断点を内含し、かつMCでは得られないすべてのセル稜切断点を漏れなく網羅することができ、これによりセル稜切断点を結ぶ境界からなるセル内形状データを漏れなく網羅することができる境界データのセル内形状データへの変換方法及び変換プログラムを提供することにある。

- 20 本発明によれば、対象物の境界データからなる外部データ(12)を直交セル(13)に分割する分割ステップ(A)と、前記境界データとセルの稜との交点をセル稜切断点とする切断点決定ステップ(B)と、求めたセル稜切断点を結ぶ境界をセル内形状データとする境界決定ステップ(C)と分割された各セルを境界面を含まない非境界セル(13a)と境界面を含む境界セル(13b)とに区分するセル区分ステップ(D)と、境界セルを構成するセルデータをセル内形状データより内側の内部セルデータと外側の外部セルデータに区分する境界セルデータ区分ステップ(E)とを有する、ことを特徴とする境界データのセル内形状データへの変換方法及び変換プログラムが提供される。
- 25

この方法及び変換プログラムによれば、分割ステップ(A)とセル区分ステッ

プ (D) により、対象物の外部データ (12) を直交格子のセル (13) に分割したセルの階層として小さい記憶容量で外部データ (12) を記憶することができる。

5 また、切断点決定ステップ (B) において、境界データとセルの稜との交点をセル稜切断点とするので、「セル稜の両端の数値の符合が異なるならばその稜上に一つの切断点を設け、符合が同じならば切断点は設けない」MC によるすべての切断点配置を内含し、かつそれ以外の境界面とセル稜線との全ての切断点配置を 1 稜 1 切断点条件の下で漏れなく網羅することができる。

10 更に、境界決定ステップ (C) において、求めたセル稜切断点を結ぶ境界をセル内形状データとするので、MC によるすべてのセル内形状パターンを包含し、かつそれ以外のセル内形状パターンを 1 稜 1 切断点条件の下で漏れなく網羅することができる。

15 また、境界セルデータ区分ステップ (E) において、境界セルを構成するセルデータをセル内形状データより内側の内部セルデータと外側の外部セルデータに区分するので、すべてのセルデータを隣接するセルとの連続性を保ちながら、非境界セルデータと境界セルデータに区分できる。

20 本発明の好ましい実施形態によれば、前記セルは、二次元では正方形セルや長方形セルを含む四角形セルであり、切断点決定ステップ (B) において、境界データとセルの稜との $2^4 = 16$ 通りの交点をセル稜切断点とし、更に四角形セルを正方形セルと見なした上での回転操作による同値類を同一パターンとして全 6 パターンに区分する。

この方法により、2 次元セルの場合に、セル稜切断点のパターンを MC による 4 パターンを内含する全 6 パターンに区分し、1 稜 1 切断点条件の下で起こり得るセル稜切断点のパターンを漏れなく網羅することができる。

25 前記境界決定ステップ (C) において、前記 6 パターンすべてに対して、切断線分 (=セル稜切断点を結ぶ境界線) の配置をセル内形状データとする。

また、前記境界決定ステップ (C) において、セル内形状データを三次元の回転操作による同値類を同一パターンとして 22 種類のセル内形状パターンに区分する。

これらの方法により、MCによるすべてのセル内形状データを内含し、かつ1稜1切断点条件の下で起こり得るセル内形状データを漏れなく網羅することができる。

5 本発明の別の好ましい実施形態によれば、前記セルは三次元では、立方体や直
方体を含む6面体セルであり、切断点決定ステップ(B)において、境界データ
とセルの稜との $2^{12} = 4096$ 通りの交点をセル稜切断点とし、更に回転操作
と鏡映操作による同値類を同一パターンとして全144パターンに区分する。

10 この方法により、3次元セルの場合に、セル稜切断点のパターンをMCによる
14パターンを内含する全144パターンに区分し、1稜1切断点条件の下で起
こり得るセル稜切断点のパターンを漏れなく網羅することができる。

前記切断点決定ステップ(B)において、更に切断点の存在／非存在に関する
反転操作による同値類を同一パターンとしてセル稜切断点が0～6個の87パタ
ーンに区分する。

15 この方法により、セル稜切断点が0～6個の87パターンで、セル稜切断点の
全144パターンを漏れなく再現することができる。

前記境界決定ステップ(C)において、前記全パターンすべてに対して、セル
稜切断点を結ぶ境界面をセル内形状データとする。

20 この方法により、MCによるすべてのセル内形状データを内含し、かつ1稜1
切断点条件の下で起こり得るセル内形状データを漏れなく網羅することができ
る。

本発明のその他の目的及び有利な特徴は、添付図面を参照した以下の説明か
ら明らかになる。

図面の簡単な説明

25

図1は、V-CADの原理図である。

図2a乃至図2dは、2D-MCの同値類4種を示す図である。

図3a乃至図3nは、3D-MCの切断点配置の同値類を全てを示す図であ
る。

図 4 a、b、c、d、e、f は K T C の典型例である。図 4 g は図 4 f を M C で表現したものである。

図 5 a と図 5 b は、M C と K T C のセル稜上の切断点の相違を示す図である。

図 6 は、本発明のデータ変換方法及び変換プログラムのフロー図である。

5 図 7 a 乃至図 7 f は、2 D-K T C における切断点配置の全ての同値類を示す図である。

図 8 a 乃至図 8 v は、図 7 の上での 2 D-K T C における切断線分の配置の全ての同値類を示す図である。

図 9 は、立方八面体（準正多面体の一つ）である。

10 図 1 0 a 乃至図 1 0 a d は、3 D-K T C における切断点配置のうち切断点個数が 0 ー 4 個の場合の同値類 3 0 個を示す図である。

図 1 1 a 乃至図 1 1 a a は、3 D-K T C における切断点配置のうち切断点個数が 4 又は 5 個の場合の同値類 2 7 個を示す図である。

15 図 1 2 a 乃至図 1 2 a d は、3 D-K T C における切断点配置のうち切断点個数が 6 個の場合の同値類 3 0 個を示す図である。

図 1 3 は、与えられた全ての切断点を結ぶ線分が立方体の表面上で閉ループを構成する例を示す図である。

図 1 4 は、図 9 の立方八面体の頂点 1 2 個と稜 3 6 本のパスとの関係を平面上のグラフとして表現したものである。

20 図 1 5 は、閉ループが定まってもセルが分割されない例を示す図である。

図 1 6 a、b、c は、閉ループが作れてもそれを縁とする 3 角形分割の仕方によってはセルが 2 分割にも 3 分割にも成り得る例を示す図である。

図 1 7 は、1 本の閉ループで全ての切断点を結ぶことはできなくてもセルを 2 分割する例を示す図である。

25 図 1 8 a、b、c は、切断点を結ぶ閉ループが 6 角形の時、それを正 6 角形とみなしカタラン数から得られる 1 4 通りの三角形分割を同値類 3 個で示す図である。

図 1 9 a 乃至図 1 9 d は、サイクライドと金型の B-r e p 形状表現と K T C の面張りとを比較したディスプレイ上の画像である。

好ましい実施例の説明

5

以下、本発明の好ましい実施形態を図面を参照して説明する。

図6は、本発明のデータ変換方法及び変換プログラムのフロー図である。この図に示すように、本発明の方法及び変換プログラムは、分割ステップ(A)、切断点決定ステップ(B)、境界決定ステップ(C)、セル区分ステップ(D)及び境界セルデータ区分ステップ(E)からなる。

外部から入力する外部データ12は、多面体を表すポリゴンデータ、有限要素法に用いる四面体又は六面体要素、3次元CAD又はCGツールに用いる曲面データ、或いはその他の立体の表面を部分的な平面や曲面で構成された情報で表現するデータである。

15 外部データ12は、このようなデータ(S-CADデータと呼ぶ)のほかに、
(1) V-CAD独自のインターフェース(V-interface)により人間の入力により直接作成されたデータと、(2)測定機やセンサ、デジタイザなどの表面のデジタイズデータや、(3)CTスキャンやMRI、および一般的にVolumeレンダリングに用いられているボクセルデータなどの内部情報もも
20 つVolumeデータであってもよい。

分割ステップ(A)では、外部データ取得ステップ(図示せず)で取得した対象物の境界データからなる外部データ12を直交格子のセル13に分割する。

2次元セルの場合には、この分割は四分木分割により長方形セルに分割する。

また3次元セルの場合には、八分木(オクトリー、octree)分割により
25 直方体のセル13に分割する。オクトリー表現、すなわち八分木による空間分割とは、目的の立体(対象物)を含む、基準となる直方体13を8分割し、それぞれの領域の中に境界面が含まれなくなるまで再帰的に8分割処理を指定されたセルサイズまで繰り返す。この八分木分割によりボクセル表現よりも大幅にデータ量を減らすことができる。

四分木又は八分木による空間分割により分割された一つの空間領域をセル 1 3 とよぶ。セルは長方形又は直方体である。長方形又は直方体は、特別な場合として正方形及び立方体であるが、より一般的には稜が互いに直交していない四角形や 6 面体でも良い。このセルによる階層構造、分割数もしくは分解能によって空間中に占める領域を表現する。これにより空間全体の中で対象は大きさの異なるセルを積み重ねたものとして表現される。

切断点決定ステップ (B) では、境界データとセルの稜との交点をセル稜切断点 1 5 とする。

2 次元セルの場合に、切断点決定ステップ (B) において、境界データとセルの稜との $2^4 = 16$ 通りの交点パターンをセル稜切断点配置とし、更に三次元の回転操作による同値類を同一パターンとして後述する全 6 パターンに区分する。

また 3 次元セルの場合には、切断点決定ステップ (B) において、境界データとセルの稜との $2^{12} = 4096$ 通りの交点パターンをセル稜切断点配置とし、更に回転操作と鏡映操作による同値類を同一パターンとして後述する全 144 パターンに区分する。3 次元セルの場合にはパターン数が多いので、更に切断点の存在／非存在に関する反転操作による同値類を同一パターンとしてセル稜切断点が 0 ～ 6 個の 87 パターンから、切断点 7 ～ 12 個までの全 144 パターンを再現できる。

境界決定ステップ (C) では、求めたセル稜切断点を結ぶ境界をセル内形状データとする。

2 次元セルの場合に、境界決定ステップ (C) において、セル稜切断点の 6 パターンすべてに対して、セル稜切断点を結ぶ切断線分配置をセル内形状データとする。更に具体的には、セル内形状データを三次元の回転操作による同値類を同一パターンとして後述する 22 種類のセル内形状パターンに区分するのがよい。

また 3 次元セルの場合には、境界決定ステップ (C) において、セル稜切断点の全パターンすべてに対して、セル稜切断点を結ぶ近似境界面 (= 切断三角形配置) をセル内形状データとする。なお、後述する具体例では、セル稜切断点を結ぶ近似境界面を求めることを「面を張る」と表現することもある。

セル区分ステップ (D) では、分割された各セルを境界面を含まない非境界セ

ル 1 3 a と境界面を含む境界セル 1 3 b とに区分する。

すなわち本発明では境界セル 1 3 b を表現するために四分木又は八分木を使い、完全に内部に含まれるものはその最大の大きさをもつ内部セル 1 3 a とし、外部データ 1.2 からの境界情報を含むセルは境界セル 1 3 b とする。

- 5 境界セルデータ区分ステップ (E) では、境界セルを構成するセルデータをセル内形状データより内側の内部セルデータと外側の外部セルデータに区分する。

本発明の方法では、必要に応じてステップ (A) ーステップ (E) を繰り返し行う。また、得られた V- CAD データを用いて、例えば、設計・解析・加工・組立・試験等のシミュレーションを順次行い、これを出カステップ (例えば C A

- 10 M やポリゴンデータとして) に出力する。

また、本発明の変換プログラムは、上述したステップ (A) ーステップ (E) を実行するためのコンピュータプログラムであり、コンピュータに実装して使用する。

以下、本発明を更に詳細に説明する。

- 15 1. 本発明では、セル内面を生成する為の新しい手法を提案する。これは M a r c h i n g C u b e 法のセル内面パターンを完全に包含し、より一般的な手法である。

- 20 本発明では、ボクセル集合にポリゴンなどの形状を読み込んでボリュームデータを生成するときに、サンプリング点としてセルの稜と形状表面との交点を切断点として記録し、これら切断点情報をもとに形状表面を復元する。

また本発明では、切断点からのセル内面生成パターンをまず 2 次元において完全に定義する。すなわち、切断点配置の同値類の数え上げ (6 パターン) およびそれら全切断点配置に対してセル内面が張られる全ての可能性 (2 2 通り) を網羅する。

- 25 3 次元に対しては、切断点配置に対する同値類の数え上げ (1 4 4 パターン) を本発明で行った。また、3 次元のセル内面生成について、すべての切断点配置の内、過半数のものに対しては、立方体の 6 面上で切断点を自己交差なく線分で結合していける。このような閉ループが構成されれば、それを外縁とするようなセル内面を比較的容易に張ることが出来る。数え上げの結果、全切断点を 1 回ず

つ通る 1 本の閉ループを有する切断点の配置は 1 4 4 パターンの内 8 7 パターンである。閉ループを用いて張られたセル内面の実例を後述する。

1. 1 従来型 C A D の表面形状をセル空間に読み込んで、表面とセルの稜との交点（切断点）を記録し、そこからもとの表面形状を三角形面として近似することが本発明の主題である。

1. 2 M a r c h i n g C u b e s (M C)

上述した M a r c h i n g C u b e s (M C と略す) では、セルの 8 頂点に正負の数値が書き込まれていて、それをもとに等値面を生成する（以下では値がゼロの面を考える）。立方体の稜の両端の数値の符合が異なるならばその稜上に一つの切断点を設け、符合が同じならば切断点は設けない。それを立方体の 1 2 稜について行なったあと、その切断点をもとに面を張るというものである。

M C では、簡潔なアルゴリズムで頑健に面が張れるので、広く世の中で使われるようになった。M C の中身は次の 2 つにまとめられる。即ち、（1）切断点配置のパターン分類、および（2）各切断点配置に対するセル内面の張り方の定義（つまり切断点をどのようにつなぐか）である。M C の曖昧性の問題とは、ここでいう（2）のセル内面の張り方が必ずしも一意でないということであるが、実装上一意に面が張られるように指定することは難しいことではない。それは例えば、曖昧さが生じる場合に対して、値の大きい頂点同士が繋がるようにセル内面を張ると決める、などすれば良い。或いは、値が小さい方の頂点同士を繋ぐと決めても良い。M C の頑健さとは、このように決めることで穴が無く張れる、すなわちセル内面を構成する 3 角形の稜が 2 枚の 3 角形で共有されていることを指す。

1. 3 K i t t a C u b e s (K T C)

本発明において、切断点を頂点とする切断三角形で表面形状を近似する為の新しい広義の手段を提案するが、それを K i t t a C u b e s （以下、K T C と略す）と名づける（K i t t a は、日本語の「切った」を意味している）。

上述した M C では、頑健にセル内面が張られるが、そのことは、必ずしも形状を正しく表現していることを意味しない。同じ解像度（＝同じセルの大きさ）で形状表現をする際、K T C を使えば M C よりも正確に表現出来ることが、本発明

で明らかになる。

KTCの正確な定義を行なう前に、KTCがMCよりも正確に形状表現出来ることを示す典型的な実例を二次元にて与えておく（図4a、b、c）。上述したようにMCにおいては、図4aの様な状況では正方形セルの4頂点は、いずれも形状の外部に位置するので同じ符合をもち、それゆえセルの4稜には切断点が発生することは無く、結果として図4aの場合セル内面は全く張られない。これは、MCの立場に立てば、この形状を表すには現在の解像度では粗すぎたということ

次に同じ解像度に対してKTCを適用する。切断点のチェックにより図4bの様な切断点が記録される。1稜上の切断点個数を1個までとし図4bに現れた2個の切断点を適当な位置の1個に統合すれば、最終的に図4cの様なセル内面が張られることになる。両者の表現力の差は明白である。図4aは極端な例であるが、本質的に同じ不具合は頻繁に発生しうるものであり、図4dもその一例である。曲がった境界面とセル稜の交差において、頻繁に発生する。KTCではこれを図4fのように近似する。MCでは図4gの様に近似される。図4cおよび図4fは二次元における一例である。三次元においては、さらに多くの場合がKTCのみで表現可能である。同じ解像度でのKTCはMCより格段に表現力が豊かであることがわかる。

実は、アルゴリズムの枠組みをKTCとMCとで比較した場合、KTCはMCを完全に包含していることが後述される。つまり、MCパターンはKTCパターンの部分集合である。その意味で、KTCの形状表現がMCよりも豊かであるのは当然である。

図4a、b、cにおいて、1稜上の切断点を1個までに制限したが、MCとKTCの枠組みを理解する為には、この制限が詳細な意味において明確な差を持つことを認識することが重要である。MC構築の際にも、切断点個数は1稜上で0個または1個に制限されていた。本発明においても、切断点の個数は1稜上で0個または1個の枠組みでKTCを構築する。両者の差は、MCではセルの各稜の両端の符合が正負逆の場合に対してのみその稜上に切断点を1つ発生させるが（図5a）、KTCでは1つの稜上に切断点を与えられたとき、その両端の符合

は正負逆の場合のみならず、符合が同じ場合にも与えられる（図 5 b）。

以下、MCの場合を「狭義 1 稜 1 切断点条件」、KTCの場合を「広義 1 稜 1 切断点条件」と呼び、これらを明確に区別することにする。図 5 a と図 5 b から明らかな様に、広義 1 稜 1 切断点条件は狭義 1 稜 1 切断点条件を完全に含んでいる。したがって、両者から与えられる二次元及び三次元の切断点配置のパターン

2. 二次元 K i t t a C u b e s (2D-KTC) KTCを2次元において構成する。

2. 1 2D-KTCにおける切断点配置の分類

10 2D-KTCは、2段階で構成される。第1段階は、正方形の4稜に対する切断点配置の分類であり、第2段階は各切断点配置に対する切断線分（＝切断点を両端に持つ線分）の配置の分類である。

図 7 a 乃至図 7 f は、2D-KTCにおける切断点配置のすべてのパターンを示す図である。4稜の各々に対する、切断点の存在または非存在の2つの可能性から $2^4 = 16$ 通りであるが、それらを回転操作に対する同値類を数え上げると表 1 および図 7 a 乃至図 7 f の 6 パターンにまとめられる。なおこの図で丸で囲んだものは、2D-MCに存在するものを示している。

切断点の存在非存在に関する反転操作を同値類の分類に加えるならば、6パターンは4パターンにまとめられる。ただし、2. 2で切断線分の配置を扱う際には、6パターン全てに対して定義する必要がある。

【表 1】

切断点個数：		1, 3	2	合計 (K=0-4)
切断点配置の総数： $\binom{4}{k}$		4	6	16
同値類の個数		1	2	6 (4)
図 7 での指標	図7a, 図7f	図7b, 図7e	図7a, 図7f	—

25 後述する Appendix A, Bにおいて2Dおよび3DのMCを扱うが、MCにおいて頂点の白黒塗りわけ（これは頂点の値の正負の区別に対応）の白黒反転がセル内面の分類上許されるのは、白黒反転後の切断点配置は、白黒反転前の切断点配置と不変だからである。

図 7 a 乃至図 7 f の各配置の縮退度は、順に 1, 4, 4, 2, 4, 1 である

(足し合わせると16)。ここで、「縮退度」とは、回転操作で1つの同値類へと集約された配置の数である。

2. 2 2D-KTCにおける切断線分配置

2D-KTCの第2段階に進む。ここでは、2. 1で得られた6種類の切断点配置の各々に対して、切断線分配置のあらゆる可能性を網羅する。網羅のポイントは、「注目しているセル内に切断線分を配置する際に、そのセルの稜上に存在する全ての切断点を利用する必要はない」ということである。一つの稜は、2つのセルに共有されており、その稜に切断点の一つあったとき、もし片方のセル内でそれがセル内線を張るために利用されなかったとしても、他方のセルで利用される可能性がある。

もちろん、どちらのセルからも利用されない可能性もある。それは、非常に小さい形状が、その1本の稜とだけ交差する場合である。それに対する実装上の処理としては、切断点情報を活かす態度としては、その稜上に微小な線分を置くことになるだろうし、別の態度は、その切断点を線張りに全く利用しないことである。ただし、線分を置く事(3次元では面分を置く事)は、形状表面が多様体でなくなることを意味するので、本発明中では網羅の対象としない。同じ理由で、セル内で切断線分同士が交差する場合や分岐(=同一セル稜上で3本の切断線分が交わっている)している場合も数え上げの対象から除外した。

図8a乃至図8vは、2D-KTCにおける切断線分の配置の全てを示す図であり、2. 1で得られた6種類の切断点配置の各々に対して、線張りのあらゆる可能性を調べた結果である。なおこの図で丸で囲んだものは、2D-MCに存在するものを示しているが、2D-KTCの部分集合に過ぎないことがわかる。

これらの同値類(equivalence class)を数え上げる際には三次元の回転操作が利用された。切断線分の接続が多様体的つまり交差や分岐を持たないと仮定すれば、図8a乃至図8vの4頂点を白と黒で塗り分けることが出来る。MCの場合と違って、この塗りわけは切断線分配置後に行われる。図8の切断線分配置パターンに注目すると、例えば2A(1), 3(5), 4(9)のように同じタイプのものが現れるが、全ての切断点配置に対する面の張り方を網羅する目的の為に、どちらも省略できない。ちなみに図8a乃至図8vに描か

れた 22 種類のパターンを切断線分配置で分類すれば 10 ケースになる。

3. 三次元 K i t t a C u b e s (3D-KTC)

3. 1 3D-KTCにおける切断点配置の分類

5 総数 $2^{12} = 4096$ の切断稜配置が、回転操作と鏡映操作のみを許したとき、
いくつの同値類にまとまるか、またそれらはどのような配置であるかを解き明かす。

10 まず、【数 1】の (1) (2) 式が成り立つから、切断点個数が 0～5 個に対する配置に切断点の有無に関する反転操作をすることで切断点個数が 7～12 個に対する配置が得られることがわかり、同値類に関してもその反転操作で対応づいている。

【数 1】

$$2^{12} = \sum_{k=0}^{12} \binom{12}{k} \dots(1)$$

$$\binom{12}{k} = \binom{12}{12-k} \dots(2)$$

15 まず図 9 のように立方体の辺に 1～12 までのインデックスを与えておく。正八面体群の回転操作 24 に鏡映操作を加えると 48 の置換操作が可能である。4096 個の配置の指標を 1 番目から順に一つずつ新出か既出かをチェックして行くが、そのとき個々の配置に 48 回の操作を施し、既出のリストと照らすことでそれと同じ配置が既に登場しているかどうか判断できる。表 2 に示すように、最終的に 144 種類の互いに異なる切断点配置が得られる。

【表 2】

切断点個数:k	0, 12	1, 11	2, 10	3, 9	4, 8	5, 7	6	合計 (K=0-12)
切断点配置の総数 $\binom{12}{k}$	1	12	66	220	495	792	924	4096
同値類の個数	1	1	4	9	18	24	30	144(87)

20 前段落で述べたように切断点個数が 7～12 個に対する同値類は、切断点個数が 0～5 個に対する同値類から再現できるので、切断点個数が 0～6 個に対する全 87 パターンを表 3 にまとめ、図 10 a～図 10 a d、図 11 a～図 10 a a、
25 図 12 a～図 12 a d、には図を掲げる。なおこれらの図で丸で囲んだものは、

3 D-MCに存在するものを示している。MCに現れる切断点配置パターンがK T Cの切断点配置パターンのごく一部であることがわかる。図10、11、12では、切断点個数が7～12個の場合を省略したが、2 D-K T Cの場合と同様、切断三角形の配置を考える際には全144パターンが必要となる。

5 【表3】

♣	切断点0個	4-13	(1 2 9 12)	♣	切断点6個
0-1	無し	4-14	(1 3 6 8)	6-1	(1 2 3 4 5 6)
♣	切断点1個	4-15	(1 3 6 9)	6-2	(1 2 3 4 5 7)
1-1	(1)	4-16	(1 3 6 10)	6-3	(1 2 3 4 5 9)
♣	切断点2個	4-17	(1 3 6 11)	6-4	(1 2 3 4 5 11)
2-1	(1 2)	4-18	(1 3 6 12)	6-5	(1 2 3 4 9 10)
2-2	(1 3)	♣	切断点5個	6-6	(1 2 3 4 9 12)
2-3	(1 6)	5-1	(1 2 3 4 5 10)	6-7	(1 2 3 5 6 7)
2-4	(1 7)	5-2	(1 2 3 4 9)	6-8	(1 2 3 5 6 8)
♣	切断点3個	5-3	(1 2 3 5 6)....	6-9	(1 2 3 5 6 9)
3-1	(1 2 3)	5-4	(1 2 3 5 7)	6-10	(1 2 3 5 6 10)
3-2	(1 2 5)	5-5	(1 2 3 5 8)	6-11	(1 2 3 5 7 8)
3-3	(1 2 7)	5-6	(1 2 3 5 9)	6-12	(1 2 3 5 7 9)
3-4	(1 2 9)	5-7	(1 2 3 5 10)	6-13	(1 2 3 5 7 10)
3-5	(1 3 6)	5-8	(1 2 3 5 11)	6-14	(1 2 3 5 7 11)
3-6	(1 3 9)	5-9	(1 2 3 5 12)	6-15	(1 2 3 5 7 12)
3-7	(1 3 10)	5-10	(1 2 3 7 8)	6-16	(1 2 3 5 8 9)
3-8	(1 3 12)	5-11	(1 2 3 7 9)	6-17	(1 2 3 5 8 10)
3-9	(1 7 12)	5-12	(1 2 3 7 10)	6-18	(1 2 3 5 8 11)
♣	切断点4個	5-13	(1 2 3 8 9)	6-19	(1 2 3 5 8 12)
4-1	(1 2 3 4)	5-14	(1 2 3 8 10)	6-20	(1 2 3 5 11 12)
4-2	(1 2 3 5)	5-15	(1 2 3 9 11)	6-21	(1 2 3 7 8 10)
4-3	(1 2 3 7)	5-16	(1 2 3 9 12)	6-22	(1 2 3 7 9 10)
4-4	(1 2 3 8)	5-17	(1 2 3 10 12)	6-23	(1 2 3 7 9 12)
4-5	(1 2 3 9)	5-18	(1 2 5 7 11)	6-24	(1 2 3 7 10 12)
4-6	(1 2 3 10)	5-19	(1 2 5 7 12)	6-25	(1 2 3 8 9 11)
4-7	(1 2 5 6)	5-20	(1 2 7 8 9)	6-26	(1 2 3 8 9 12)
4-8	(1 2 5 7)	5-21	(1 2 7 9 12)	6-27	(1 2 3 8 10 12)
4-9	(1 2 7 8)	5-22	(1 2 7 10 12)	6-28	(1 2 7 8 9 12)
4-10	(1 2 7 9)	5-23	(1 3 6 8 9)	6-29	(1 3 6 8 9 12)
4-11	(1 2 7 10)	5-24	(1 3 6 8 10)	6-30	(1 3 6 8 10 11)
4-12	(1 2 9 11)	—	—	—	—

144種類の配置のどれもが、実際に表面形状をセル空間に読み込んだ際の切断点配置として出現し得るものである。Appendix Bの表7に3 D-M Cの全ての切断配置を3 D-K T Cのそれと対応させた。MCはK T Cのごく一

部分でしかないことがわかる。

3. 2 3D-KTCにおける面張り定義に関して

与えられた全ての切断点を結ぶ線分がセルの表面上で閉ループを構成する一例を図13に示した。図9にセルと共に示されたのは、立方八面体（準正多面体の一つ。正3角形8枚と正方形6枚とからなる14面体）である。切断点の位置が各稜の中心点であるとしても切断点配置の数え上げや閉ループを考察する上で一般性を失わない。この立方八面体は、それら12稜上の中心点12個に対する凸包となっている。上記の閉ループを辿る為の道としては、14面体の各正方形面の2本ずつの対角線つまり全部で12本の対角線と、14面体がもともと有する24稜とを合わせた36本である。

この準正多面体の頂点12個と稜36本のパスとの関係を平面上のグラフとして表現したものが図14である。この図を元にハミルトン閉路の数え上げを説明する。このグラフにおいて12個の頂点は全て価数6で同等となっており、ここでの数え上げは、特定の一つの頂点から行うだけでよい。ハミルトン閉路として許されるパスは、立方体の表面上で与えられた全ての切断点を通して、途中で同じパスや同じ切断点を2度以上通らずに始点に戻ってくるものである。切断点個数が0-12に対する切断点配置全144種類のうちの過半数である87種類がこのような非自己交差ハミルトンパスを持つことを数え上げた。

実は、これら閉ループから生成されるセル内面の多くは、V-CADにとって好ましいものとなっている。V-CADが、セル内の情報として物理情報を持つことは上述したが、多媒質にも対応できる。そのとき異材の界面では、セル内を複数の物質が占めることとなるが、この物質の数が3種類以上になったとき、何らかの処理を施すことにより1つのセル内の物質数は2種類までに制限することが好ましい。なお閉ループから作られるセル内面の多くは、セルを2分割するので、好都合である。

ただし、全ての閉ループがセルを2領域に分けるのではない。たとえば、図15の様に閉ループが作れてもセルが分割されないこともある。図16a、b、cの例は、閉ループが作れてもそれを縁とする3角形分割の仕方によっては2分割にも3分割にも成り得ることを示している。逆に、全切断点を通る1本の閉ルー

プを作れなくてもセルを2分割する場合もあり、その一つを図17に示す。

3. 3 三角形分割に関して

閉ループが出来ると、それを縁とするようなセル内面を張ることは多くの場合容易である。セル内面を三角形分割する問題は、平面上で多角形を三角形分割する問題と関係しており、その三角形分割のパターンの場合の数は、カタラン数を用いて表されることが知られている。カタラン数と三角形分割に関しては、Appendix Cで後述する。

3. 4 3D-KTCの実装例

閉ループを利用した実装を試みた。B-rep形状表現を読み込んで切断点を記録し、それらに対して閉ループを探し、三角形分割を行った。例題は、サイクリッド(図18a)および金型(図18b)である。これらを切断点情報をもとに復元したのが、図18c, dである。これらは、KTCの面張りの可能性のごく一部分としての、閉ループから生成したものだが、十分な表現力を持っているといえる。

ここで強調しておくべきことは、これら閉ループと対応する切断点配置は、KTCの一部に過ぎないが、それでもMCの切断点配置の枠組みにはおさまり切れないものだという事である。MCの切断点配置が全て合わせても14通りであるのに対して、KTCの切断点配置144種類の内、閉ループと対応づくものだけでも前述のように87種類ある。1例を示すと、図16a乃至図16cの切断点配置は閉ループを構成可能であるが、MCの中には存在しないパターンである。さらに、図4fの三次元版として図16dも挙げておく。

4. まとめ

上述のように、KTCとMCを同じ解像度で比較するとき、KTCの方がMCよりも精密な形状表現が可能である。これは、KTCの切断三角形配置の同値類がMCのそれを完全に含んでいることから当然の結果である。

本発明では広義の1稜1切断点だけを仮定したときにKTCが示す多様さを厳密に提示した。

Appendix A: 二次元Marching Cubes (2D-MC)

図2a乃至図2dに2D-MCの同値類4種を示す。セルの4頂点上の白黒反

転操作と三次元の回転操作だけを用いてこの4パターンを得る。MCは狭義の1稜1切断条件に従うから、4つの頂点白黒塗り分けパターンと切断点配置パターンが1対1に対応する。図2a乃至図2d中各パターンにmc-0, mc-1, mc-2, mc-3のインデックスを割り当てた。

- 5 2. 1で2D-KTCを述べたが、同値類を分類する前の配置の総数は、2次元においてはMCもKTCも同じ16 ($=2^4$) であることに注意されたい。これは、正方形の頂点数と辺の数がどちらも4であることに起因する。(立方体では、頂点と稜の個数が異なるので、切断点配置の総数も3D-MCの256 ($=2^8$) に対して、3D-KTCは4096 ($=2^{12}$) と異なる。)
- 10 表4は切断点配置に関する同値類の個数を、全配置数と対応させた表である。また表5は、MCの切断点配置とKTCの切断点配置の対応表であり。ここに登場しないKTCの切断点配置、つまり図7bと図7eは、MCの切断点配置には存在しない。

【表4】

黒の頂点の個数 k	0(or 4)	1(or 3)	2	合計 (k=0-4)
配置総数 $\binom{4}{k}$	1	4	6	16
同値類の個数	1	1	2	4

【表5】

図2中の2D-MCインデックス	0	1	2	3
図8中の2D-KTCインデックス	0(1)	2A(1)	2B(1)	4(4)

Appendix B: 三次元Marching Cubes (3D-MC)

- 20 図3a乃至図3nにMCの切断点配置の同値類を全て示した。分類に用いられた操作は、頂点上の白黒反転操作、回転操作、そして鏡映操作である。その結果、256 ($=2^8$) 種類の頂点塗り分けは、これら14パターンに分類される。これらを切断点の個数に関してまとめると表6のようになる。

【表6】

黒の頂点の個数 :k	0(or 8)	1(or 7)	2(or 6)	3(or 5)	4	合計 (k=0-8)
黒頂点配置の総数 $\sum \binom{8}{k}$	1	8	28	56	70	256
同値類の個数	1	1	3	3	6	14

MCの図は、通常MCの原論文に合わせて0-14の計15通りで表されるが、ここには14通りしかないことに注意されたい(図3a乃至図3n)。省略され

たMC-1 4は、MC-1 1の鏡映対称であった。MC-1 1の面の張り方が決まれば鏡映操作によりMC-1 5のそれも一意に決まるので、本発明内での記述の一貫性（同値類の数え上げに鏡映操作も用いること）を保つ上で省略する。

図3 a乃至図3 nは原論文の図の並びと同じであるが、セル内面が省かれ、上述の理由でMC-1 4が削除されている。これらMCの全ケースとKTCとの対応を表7に示す。

【表7】

図3中の 3D-MC インデックス	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
図10, 11, 12中の 3D-KTC インデックス	0-1	3-6	4-12	6-6	6-29	5-18	7-18	9-6	4-7	6-30	8-7	6-28	8-12	12-1

Appendix C：多角形の3三角形分割とカタラン数

セルの表面を辿る閉ループを縁とするような折れ面の生成、すなわちループの内部を3三角形分割する問題は、多くの場合平面上の凸n角形を3三角形分割する問題に帰着できる。（閉ループ全体が平面的では無い場合、すなわち折れ曲がりの激しいセル内面が閉ループから生成される場合には、後者に帰着できない恐れがあるかもしれない。）

三角形分割の場合の数を求める問題は、カタラン数と関連していることが知られている。結果のみを以下に記す。

カタラン数 C_m は（数2）の（3）式で示される。このとき、凸n角形をその内部で交わらない対角線によって3三角形分割するとき、異なる分割の仕方が幾通りかを求めたい。求める数 T_n は（数2）の（4）式で与えられる。

【数2】

$$C_n = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n} \quad \dots(3)$$

$$T_n = C_{n-2} = \frac{1}{n-1} \binom{2(n-2)}{n-2} \quad \dots(4)$$

この式に、 $n=3, 4, \dots, 12$ を代入すると、 $T_3=1, T_4=2, T_5=5, T_6=14, \dots, T_{12}=16796$ が得られる。

$n=5$ 以下はさほど難しくない。 $T_6=14$ について補足する。正六角形に対して、これら14通りを三角形の回転によってまとめると図19 a、b、cに示

した3パターンにまとまる。図19a、図19b、図19cはそれぞれ6通り、2通り、6通りの三角形分割方法を代表する同値類の図示である。これらを足し合わせると14通りになることが確認される。

上述したように、本発明の方法及び変換プログラムによれば、分割ステップ
5 (A)とセル区分ステップ(D)により、対象物の外部データ(12)を直交セル(13)に分割したセルの階層として小さい記憶容量で外部データ(12)を記憶することができる。

また、切断点決定ステップ(B)において、境界データとセルの稜との交点をセル稜切断点とするので、「両端の数値の符合が異なるならばその稜上に一つの
10 切断点配置を設け、符合が同じならば切断点配置は設けない」MCによるすべての切断点を内含し、かつ1稜1切断条件の下で境界面とセル稜線とのすべての切断点を漏れなく網羅することができる。

更に、境界決定ステップ(C)において、求めたセル稜切断点を結ぶ境界をセル内形状データとするので、MCによるすべてのセル内形状データを内含し、か
15 つ1稜1切断条件の下でのセル内切断三角形配置を漏れなく網羅することができる。

また、境界セルデータ区分ステップ(E)において、境界セルを構成するセルデータをセル内形状データより内側の内部セルデータと外側の外部セルデータに区分するので、すべてのセルデータを隣接するセルとの連続性を保ちながら、内
20 部セルデータと外部セルデータに区分できる。

従って、本発明の境界データのセル内形状データへの変換方法及び変換プログラムは、MCによるすべてのセル稜切断点を内含しかつその他のすべてのセル稜切断点を1稜1切断条件の下で漏れなく網羅することができ、これによりセル稜切断点を結ぶ境界からなるセル内形状データを漏れなく網羅することができる、
25 等の優れた効果を有する。

なお、本発明をいくつかの好ましい実施例により説明したが、本発明に含まれる権利範囲は、これらの実施例に限定されないことが理解されよう。反対に、本発明の権利範囲は、添付の請求の範囲に含まれるすべての改良、修正及び均等物を含むものである。

請求の範囲

1. 対象物の境界データからなる外部データ(12)を直交格子のセル(1
5 3)に分割する分割ステップ(A)と、
前記境界データとセルの稜との交点をセル稜切断点とする切断点決定ステップ
(B)と、
求めたセル稜切断点を結ぶ境界をセル内形状データとする境界決定ステップ
(C)と
- 10 分割された各セルを境界面を含まない非境界セル(13a)と境界データを含
む境界セル(13b)とに区分するセル区分ステップ(D)と、
境界セルを構成するセルデータをセル内形状データより内側の内部セルデータ
と外側の外部セルデータに区分する境界セルデータ区分ステップ(E)とを有す
る、ことを特徴とする境界データのセル内形状データへの変換方法。
- 15 2. 前記セルは2次元では、長方形セルであり、
切断点決定ステップ(B)において、境界データとセルの稜との $2^4 = 16$ 通
りの交点をセル稜切断点とし、更に回転操作による同値類を同一パターンとして
全6パターンに区分する、ことを特徴とする請求項1に記載の境界データのセル
内形状データへの変換方法。
- 20 3. 前記境界決定ステップ(C)において、前記6パターンすべてに対し
て、セル稜切断点を結ぶ境界線をセル内形状データとする、ことを特徴とする請
求項2に記載の境界データのセル内形状データへの変換方法。
4. 前記境界決定ステップ(C)において、セル内形状データを三次元の
回転操作による同値類を同一パターンとして22種類のセル内形状パターンに区
25 分する、ことを特徴とする請求項2に記載の境界データのセル内形状データへ
の変換方法。
5. 前記セルは、3次元では、直方体セルであり、
切断点決定ステップ(B)において、境界データとセルの稜との $2^{12} = 4096$
通りの交点パターンをセル稜切断点とし、更に回転操作と鏡映操作による同値

類を同一パターンとして全 1 4 4 パターンに区分する、ことを特徴とする請求項 1 に記載の境界データのセル内形状データへの変換方法。

6. 前記切断点決定ステップ (B) において、更に切断点の存在／非存在に関する反転操作による同値類を同一パターンとしてセル稜切断点が 0 ～ 6 個の 8 7 パターンに区分する、ことを特徴とする請求項 5 に記載の境界データのセル内形状データへの変換方法。

7. 前記境界決定ステップ (C) において、前記全 1 4 4 パターンすべてに対して、セル稜切断点を結ぶ境界面をセル内形状データとする、ことを特徴とする請求項 5 又は 6 に記載の境界データのセル内形状データへの変換方法。

8. 対象物の境界データからなる外部データ (1 2) を直交格子のセル (1 3) に分割する分割ステップ (A) と、

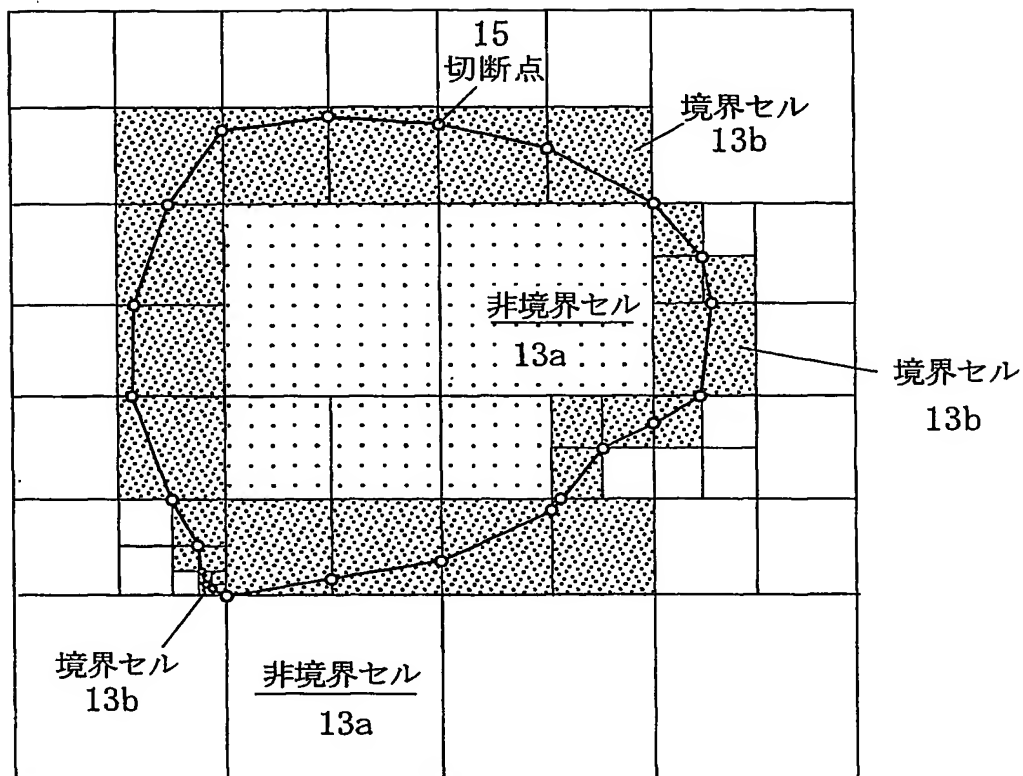
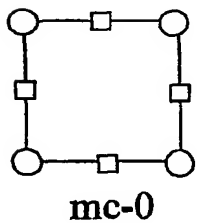
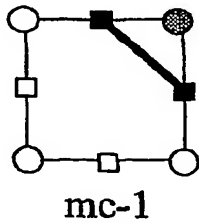
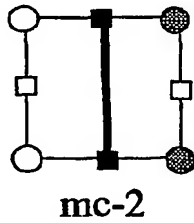
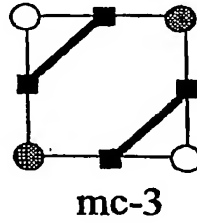
前記境界データとセルの稜との交点をセル稜切断点とする切断点決定ステップ (B) と、

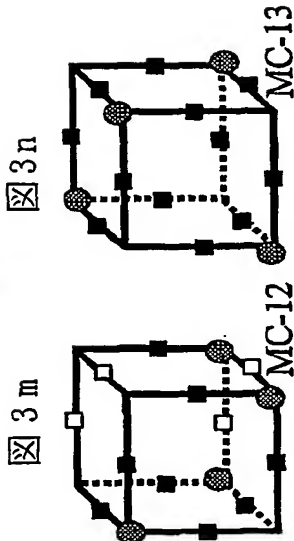
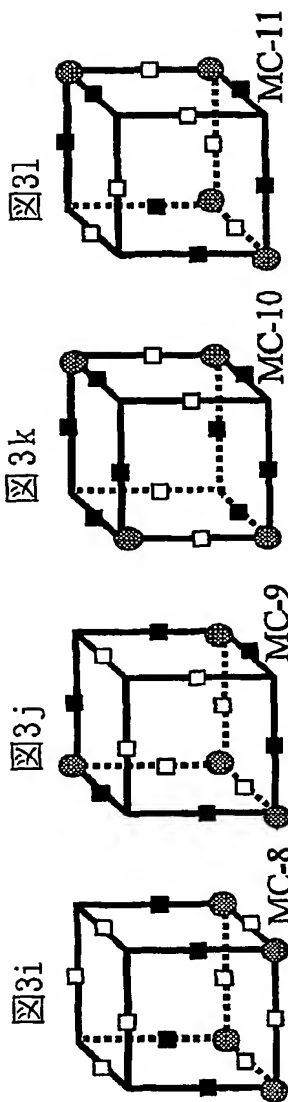
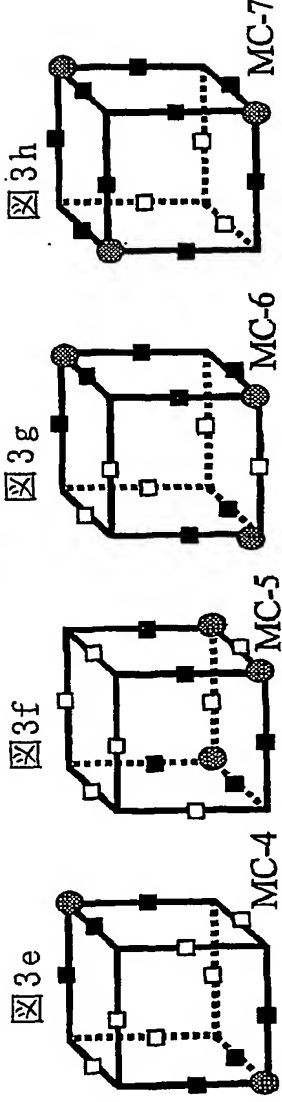
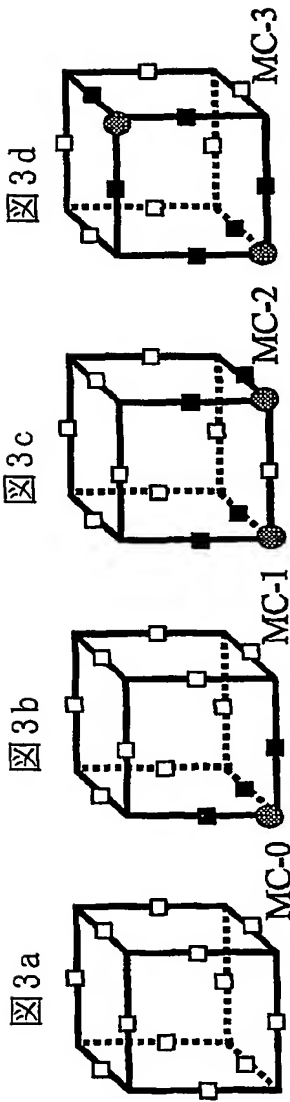
求めたセル稜切断点を結ぶ境界をセル内形状データとする境界決定ステップ (C) と

分割された各セルを境界面を含まない非境界セル (1 3 a) と境界面を含む境界セル (1 3 b) とに区分するセル区分ステップ (D) と、

境界セルを構成するセルデータをセル内形状データより内側の内部セルデータと外側の外部セルデータに区分する境界セルデータ区分ステップ (E) とを有する、ことを特徴とする境界データのセル内形状データへの変換プログラム。

図 1

図 2a
先行技術図 2b
先行技術図 2c
先行技術図 2d
先行技術



先行技術

図 4a

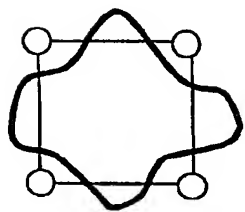


図 4b

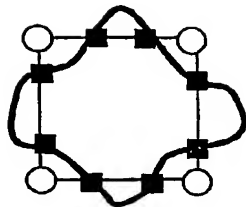
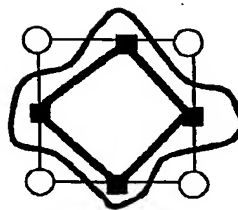


図 4c



2D-KTC

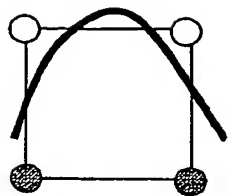


図 4d

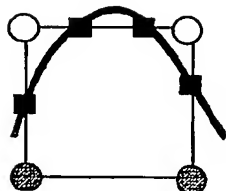


図 4e

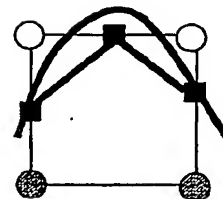


図 4f

2D-KTC

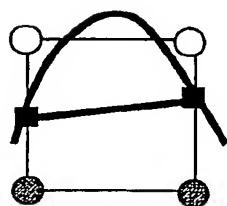


図 4g

2D-MC

図 5a

先行技術

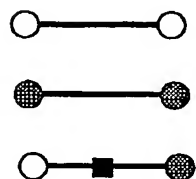
狭義の1稜1切断条件
(MC)

図 5b

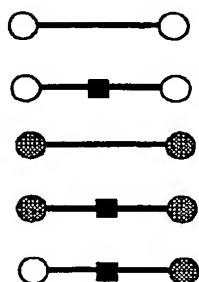
広義の1稜1切断条件
(KTC)

図 6

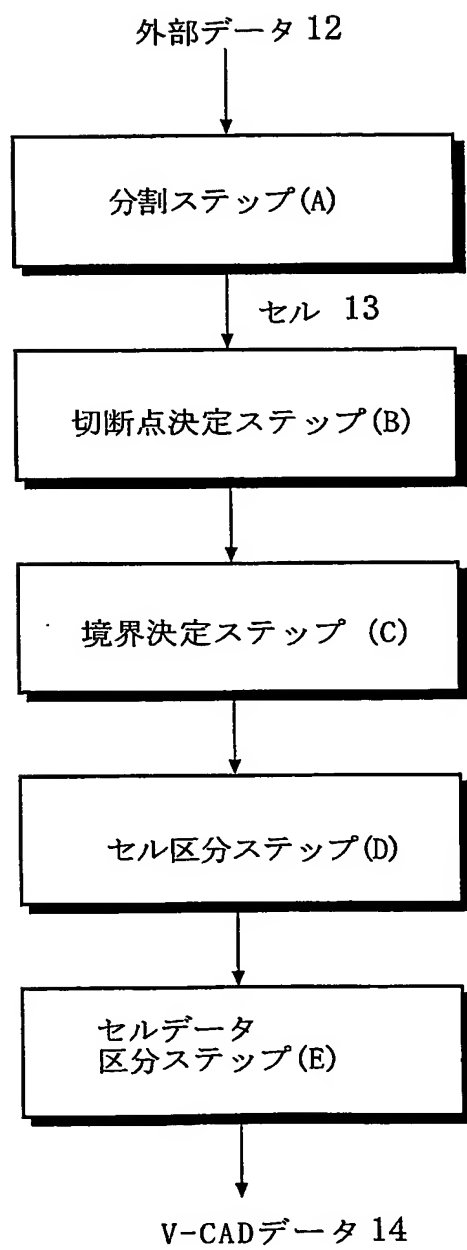


図 7a

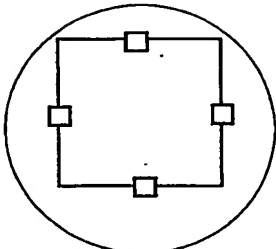


図 7b

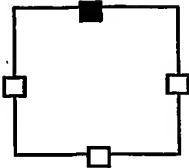


図 7c

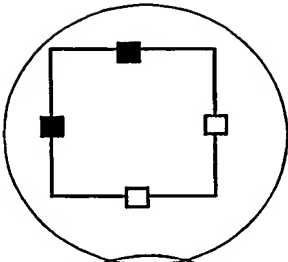


図 7d

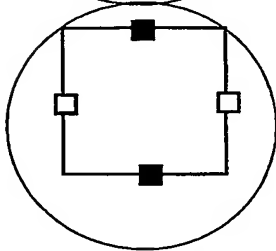


図 7e

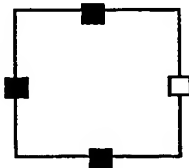
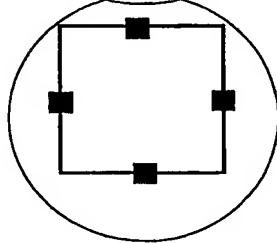


図 7f



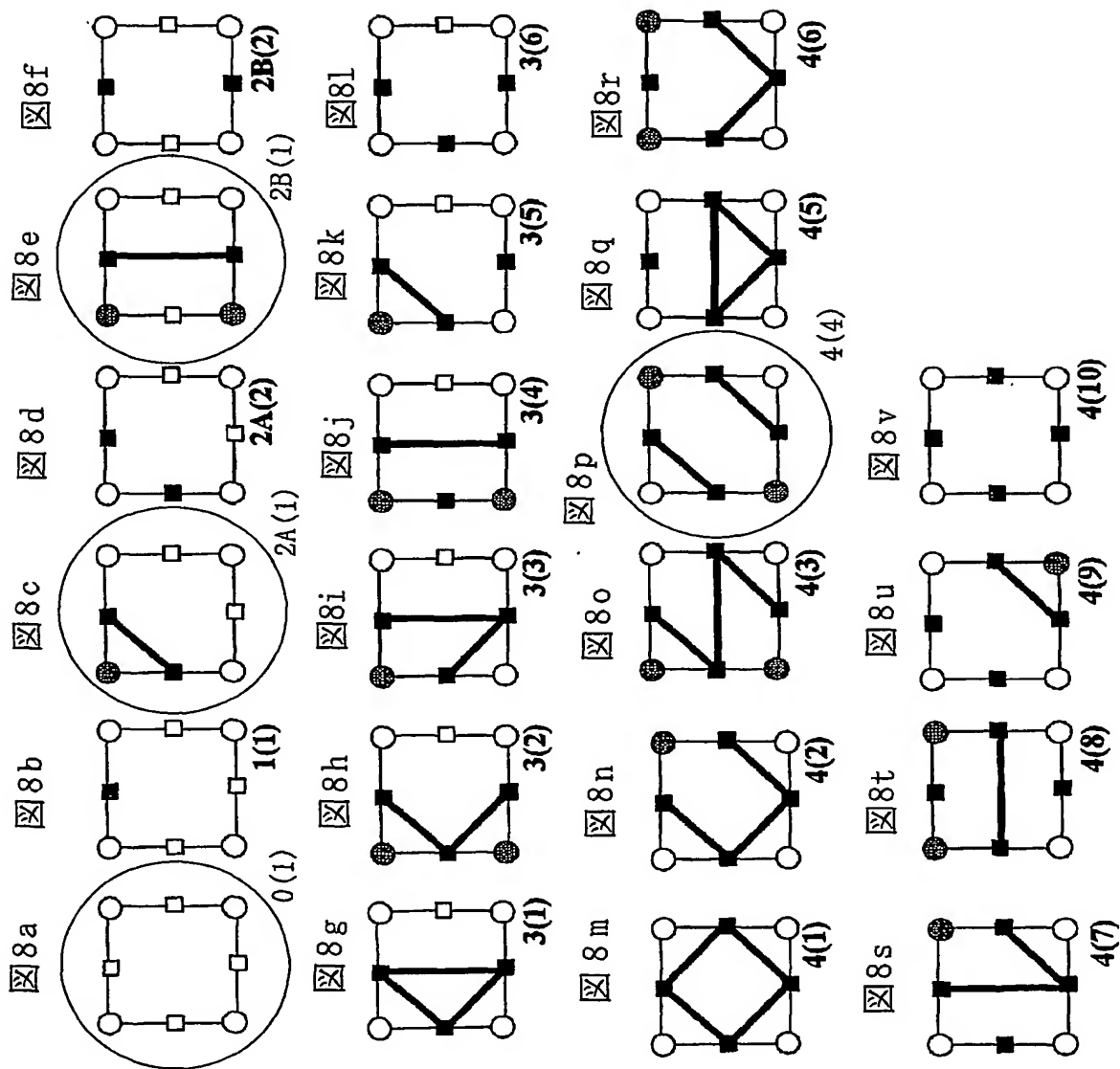
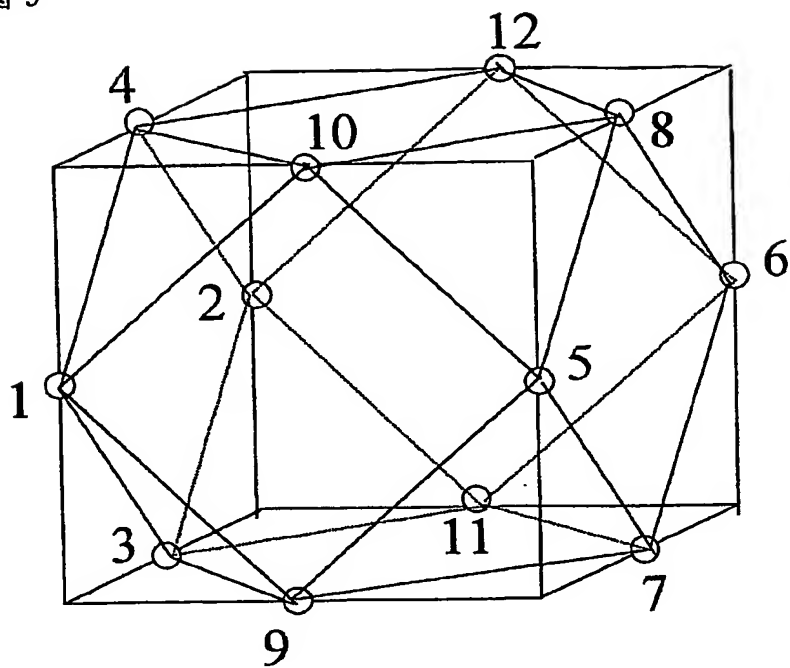
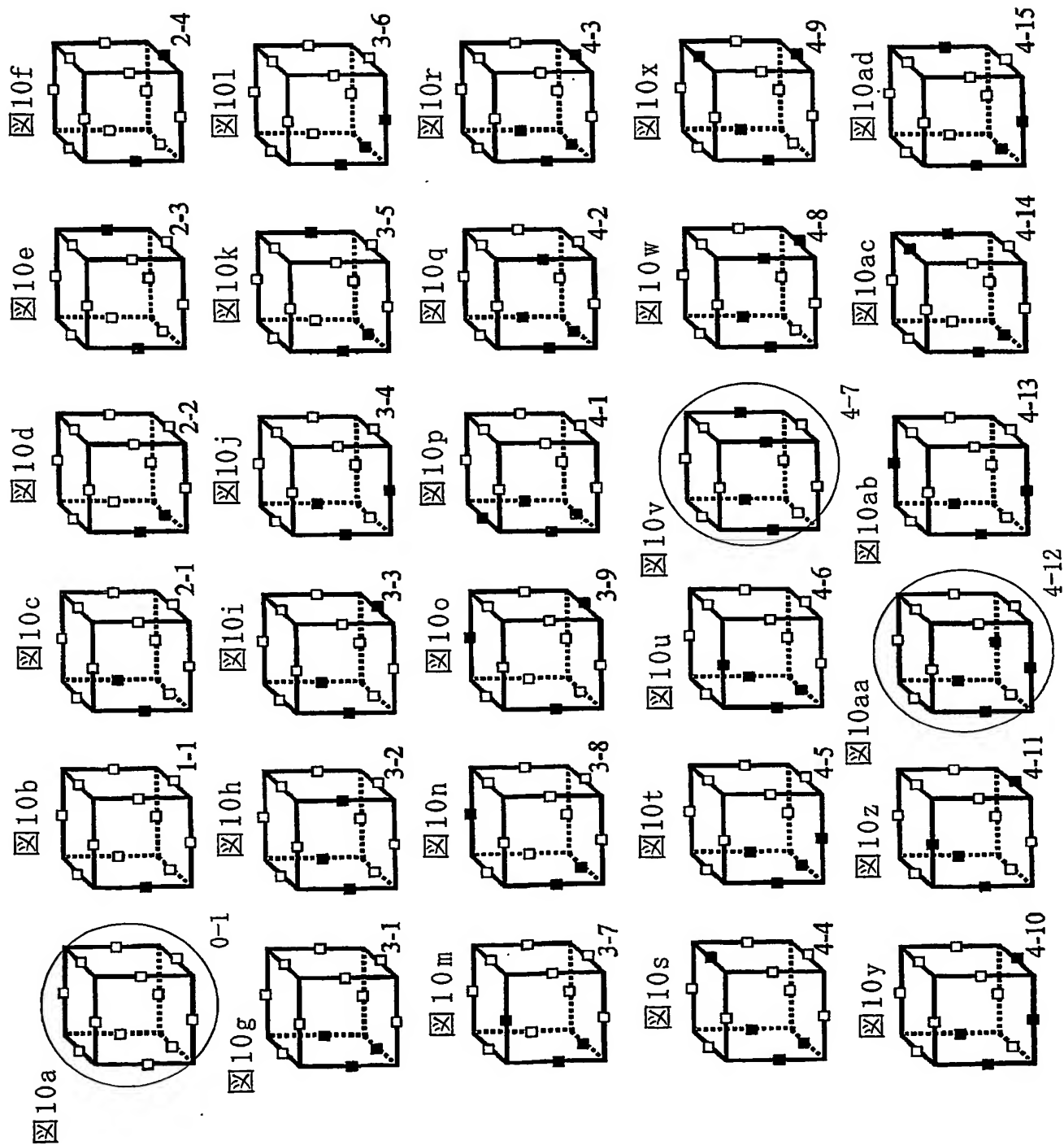
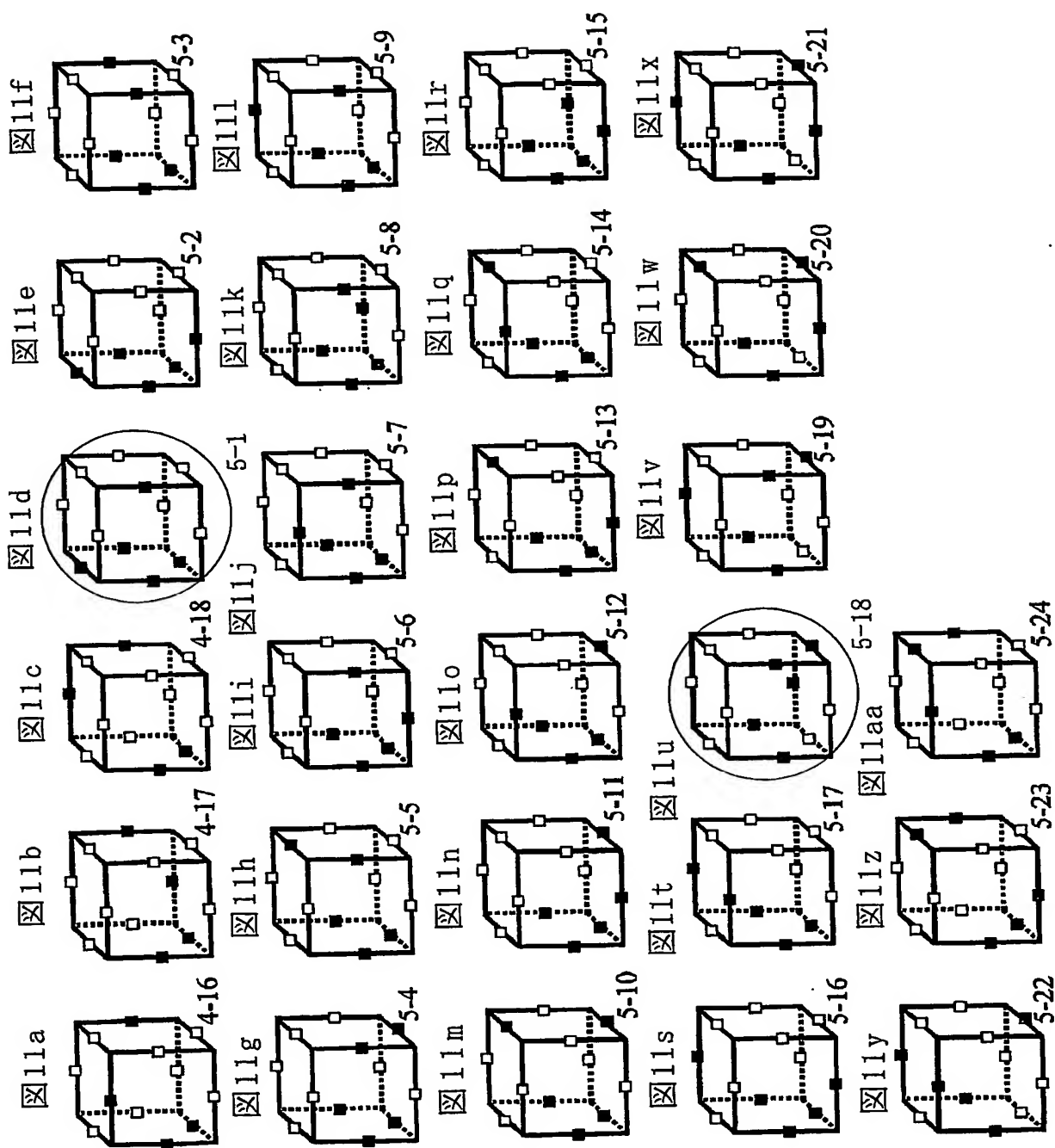


図 9







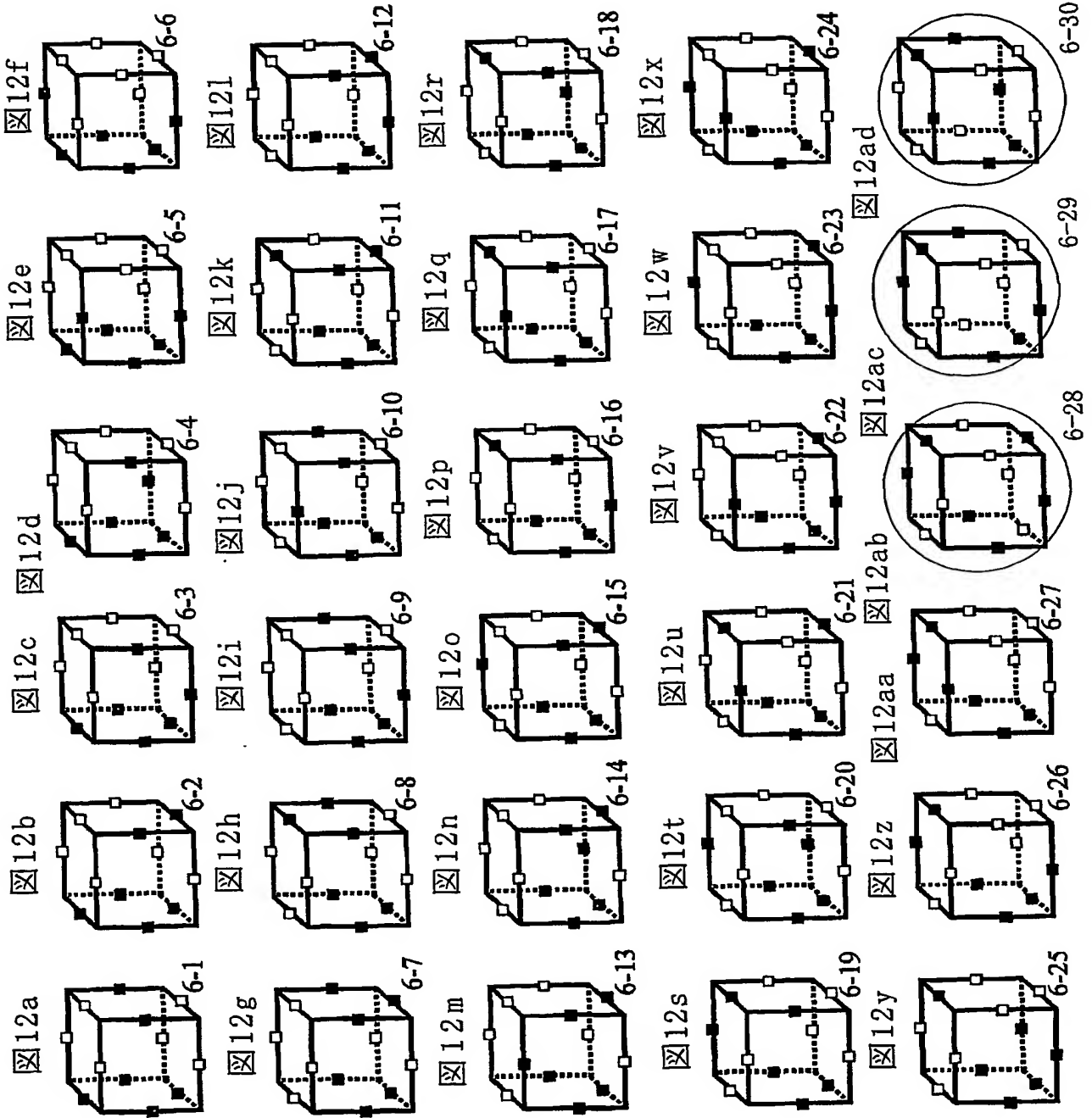


図 13

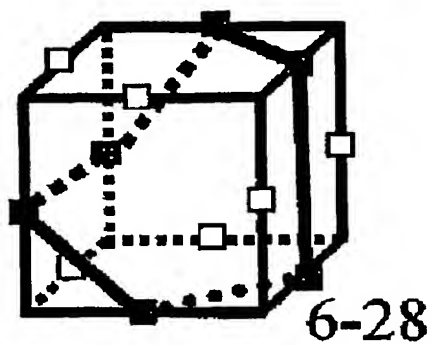


図 14

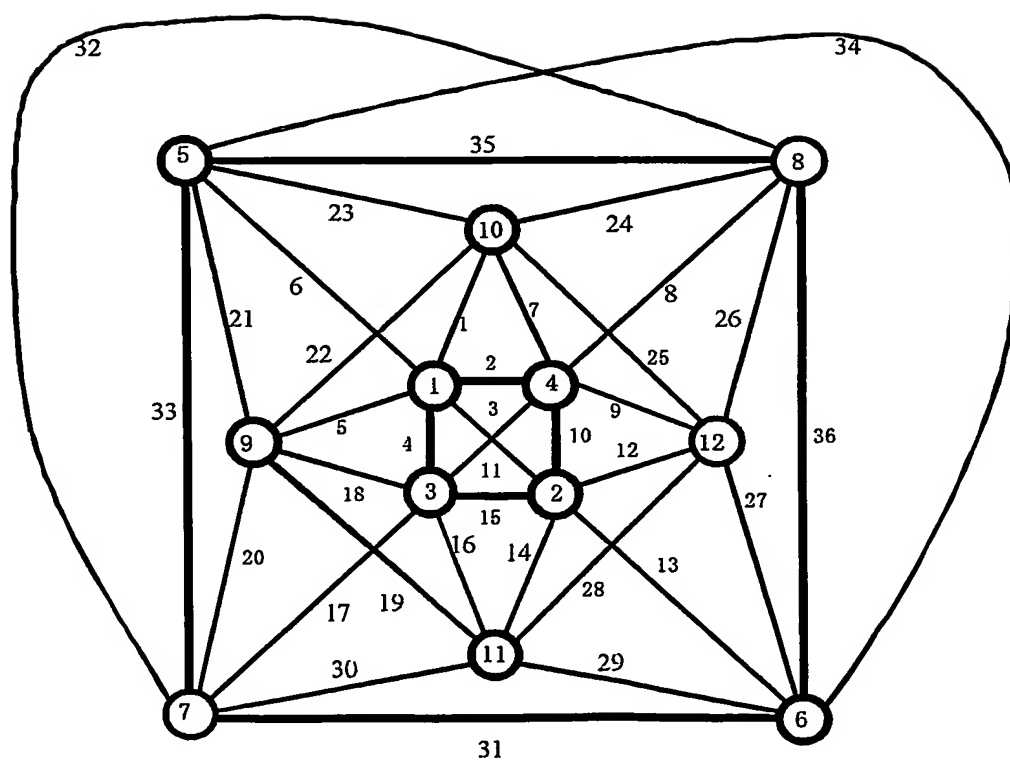


図 15

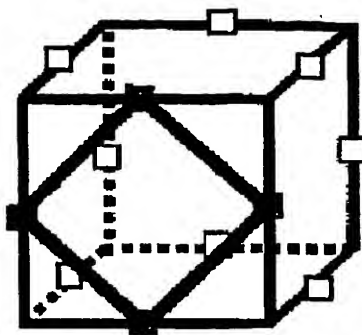


図 16a

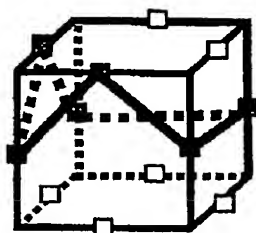


図 16b

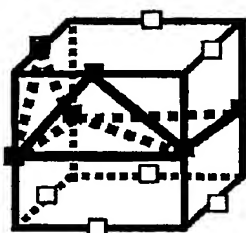


図 16c

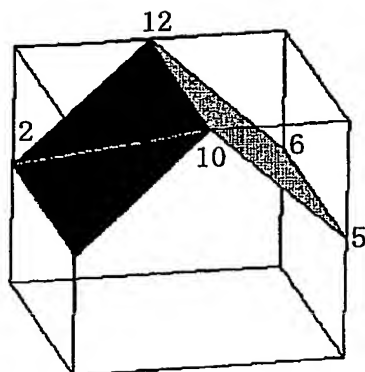
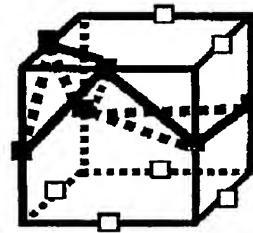


図 16d

図 17

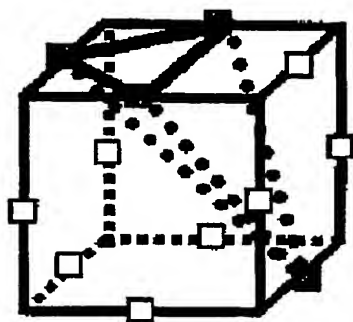


図 18a

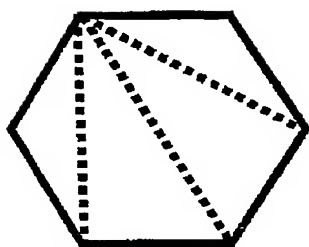


図 18b

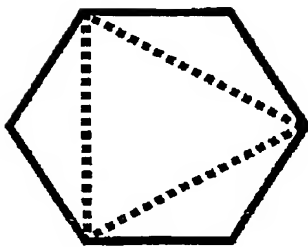


図 18c

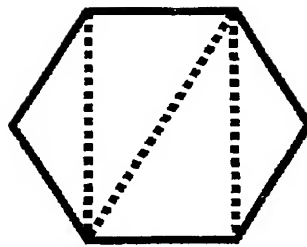


図19b

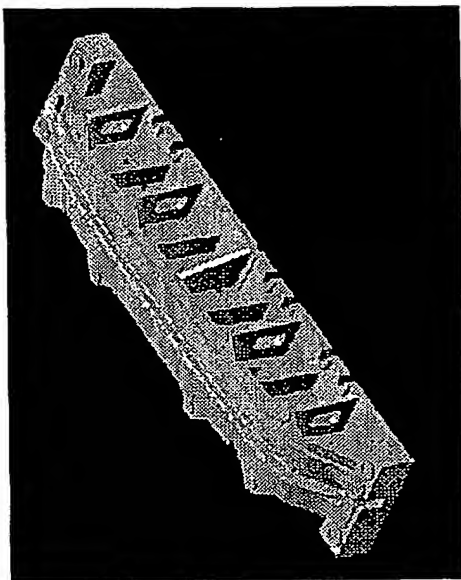


図19d

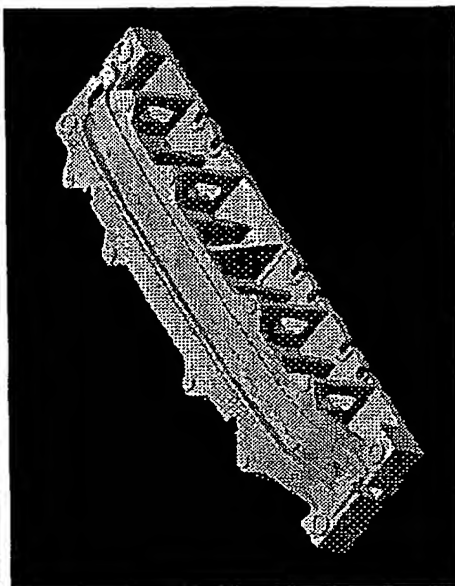


図19a

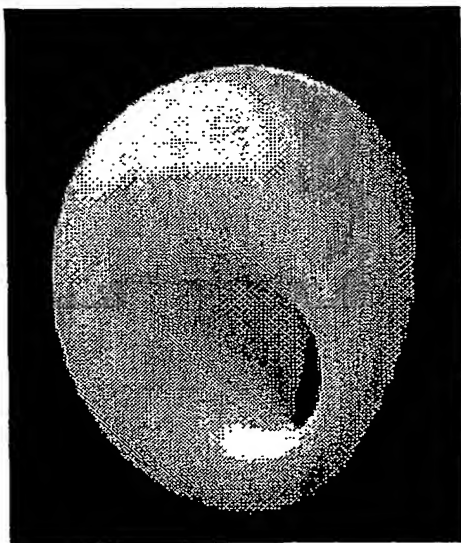
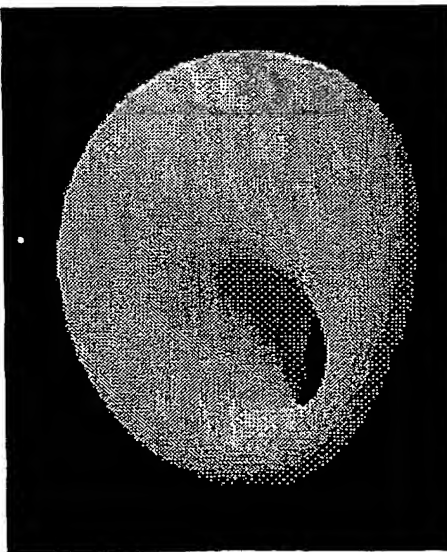


図19c



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/02187

03/505224

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁷ G06F17/50

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G06F17/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	Kazutoshi YONEKAWA et al., "Kukan Bunkatsu Model o Mochiita Keijo Modeler", Transactions of Information Processing Society of Japan, Vol.37, No.1, pages 60 to 69, 15 January, 1996 (15.01.96), full text	1, 8 2-7
Y	JP 6-348862 A (Toshiba Corp.), 22 December, 1994 (22.12.94), Par. Nos. [0004] to [0010] (Family: none)	2-7

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
 "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier document but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
20 March, 2003 (20.03.03)

Date of mailing of the international search report
01 April, 2003 (01.04.03)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

10/505224

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.

PCT/JP03/02197

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G06F17/50

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G06F17/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	Kazutoshi YONEKAWA et al., "Kukan Bunkatsu Model o Mochiita Keijo Modeler", Transactions of Information Processing Society of Japan, Vol.37, No.1, pages 60 to 69, 15 January, 1996 (15.01.96), full text	1, 8 2-7
Y	JP 6-348862 A (Toshiba Corp.), 22 December, 1994 (22.12.94), Par. Nos. [0004] to [0010] (Family: none)	2-7

☐

Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
 "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier document but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
 20. March, 2003 (20.03.03)

Date of mailing of the international search report
 01 April, 2003 (01.04.03)

Name and mailing address of the ISA/
 Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

BEST AVAILABLE COPY

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G06F17/50

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G06F17/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y	米川和利ほか、空間分割モデルを用いた形状モデラ、情報処理学会 論文誌、第37巻、第1号、60-69頁、 1996.01.15、全文	1, 8 2-7
Y	JP 6-348862 A (株式会社東芝) 1994.12.22, 【0004】-【0010】 (ファミリー無し)	2-7

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

20.03.03

国際調査報告の発送日

01.04.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

田中 幸雄



5H

9191

電話番号 03-3581-1101 内線 3531

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.